

京都大学大学院工学研究科
社会基盤工学専攻修士論文
令和 8 年 2 月



Master's Thesis
Department of Civil and Earth Resources Engineering
Graduate School of Engineering
Kyoto University
February 2026

LaTeX Gaussian Splatting だお

京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

空間情報学講座

宇野 大輝

論文要旨

水中の3次元地形の計測は水深測量 (Bathymetry) と呼ばれている。浅水域においても、河床・海底の水深測量は、地形変動のモニタリング、ハザードシミュレーション、および水生生物の生息環境評価において極めて重要である。近年、無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) を用いた写真測量 (Photogrammetry) は、広範囲を効率的に調査する手法として注目されている。しかし、空中から水底を撮影する際、水面で発生する光の屈折が、従来の写真測量における幾何学的仮定 (共線性条件) を根本的に破綻させるという課題がある。既存の手法は、屈折を完全に正確に物理的正確性を持ってモデル化しない経験的な補正や反復的な後処理に依存するか、あるいは説明可能性を欠くブラックボックス的な深層学習モデルを用いるものが多く、形状の幾何学的忠実性と外観の写実性を両立させることは困難であった。

本論文では、この課題を解決するために、物理的に忠実な二媒質屈折モデルを再構成パイプラインに直接組み込んだ“Refraction-aware 3D Gaussian Splatting”を提案する。本手法の核心的な貢献は、水中の真の位置にある 3D Gaussian を、航空画像上の見かけの位置へと解析的にマッピングする微分可能なパラメータ変換の導入にある。これにより、標準的な 3D Gaussian Splatting の柔軟なフレームワークを維持しつつ、屈折あり画像からの密な3次元形状と詳細なテクスチャ情報の復元を実現した。

評価実験では、屈折以外の光学的要因を排除し厳密な検証を行うため、物理ベースのレイトレーシングにより生成された河床のシミュレーションデータセットを用いた。その結果、水深 10 m のスケールにおいて許容誤差 10 cm とした場合の幾何学的 F1 スコアは 96% を達成した。さらに、新規視点合成 (Novel View Synthesis) においては、PSNR 25.9 dB、SSIM 0.93 という詳細な屈折なし画像の推定を達成した。提案手法により、平坦な水面条件下において、河川、湖沼、沿岸域の低コストかつ高頻度な 3D モニタリングが可能となり、水域リモートセンシング分野に新たな方法論的基盤を提供する。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	1
1.3 論文構成	1
参考文献	3

第1章 序論

1.1 研究背景

正確な水深情報 (Bathymetry Information) の取得は、洪水予測 [1]、河床地形変動モニタリング [2]、水生生物生息環境評価 [3]、沿岸域管理 [4] などの様々な分野において重要である。従来の船載ソナー [5] は深海では有効であるが、浅海では座礁リスク、狭帯域カバレッジ、高コストな運用が課題となっている。近年、航空機に搭載された光電測量システム (Airborne Light Detection and Ranging: ALB) が導入されているが、設備コストと運用コストが高いという課題がある。一方、無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) を用いた写真測量 (Photogrammetry) は、低コストで広範囲を効率的に調査する手法として注目されている。しかし、UAV による水域地形計測においては、水面で発生する光の屈折が、従来の写真測量における幾何学的仮定（共線性条件）を根本的に破綻させるという課題がある。既存の手法は、屈折を完全に正確に物理的正確性を持ってモデル化しない経験的な補正や反復的な後処理に依存するか、あるいは説明可能性を欠くブラックボックス的な深層学習モデルを用いるものが多く、形状の幾何学的忠実性と外観の写実性を両立させることは困難であった。

1.2 研究目的

本研究では、この課題を解決するために、物理的に忠実な二媒質屈折モデルを再構成パイプラインに直接組み込んだ“Refraction-aware 3D Gaussian Splatting”を提案する。本手法の核心的な貢献は、水中の真の位置にある 3D Gaussian を、航空画像上の見かけの位置へと解析的にマッピングする微分可能なパラメータ変換の導入にある。これにより、標準的な 3D Gaussian Splatting の柔軟なフレームワークを維持しつつ、屈折あり画像からの密な 3 次元形状と詳細なテクスチャ情報の復元を実現した。

1.3 論文構成

本論文の構成は以下の通りである。

- 第2章：先行研究
- 第3章：理論背景

- 第 4 章：提案手法
- 第 5 章：評価実験
- 第 6 章：考察
- 第 7 章：結論

参考文献

- [1] S. Grimaldi et al. “Effective Representation of River Geometry in Hydraulic Flood Forecast Models”. In: *Water Resources Research* 54.2 (Feb. 2018), pp. 1031–1057. ISSN: 1944-7973. DOI: [10.1002/2017wr021765](https://doi.org/10.1002/2017wr021765). URL: <http://dx.doi.org/10.1002/2017wr021765>.
- [2] Sven Hemmelder et al. “Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery—A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France”. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 73 (Dec. 2018), pp. 428–437. ISSN: 1569-8432. DOI: [10.1016/j.jag.2018.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.016). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.016>.
- [3] J.R. Thomson et al. “A geomorphological framework for river characterization and habitat assessment”. In: *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 11.5 (Sept. 2001), pp. 373–389. ISSN: 1099-0755. DOI: [10.1002/aqc.467](https://doi.org/10.1002/aqc.467). URL: <http://dx.doi.org/10.1002/aqc.467>.
- [4] Davide Pasquali and Alessandro Marucci. “The Effects of Urban and Economic Development on Coastal Zone Management”. In: *Sustainability* 13.11 (May 2021), p. 6071. ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su13116071](https://doi.org/10.3390/su13116071). URL: <http://dx.doi.org/10.3390/su13116071>.

- [5] Francesco Giordano et al. “Integrating Sensors into a Marine Drone for Bathymetric 3D Surveys in Shallow Waters”. In: *Sensors* 16.1 (Dec. 2015), p. 41. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s16010041](https://doi.org/10.3390/s16010041).
URL: <http://dx.doi.org/10.3390/s16010041>.